Компьютер из деталей детского конструктора играет в «крестики-нолики»

А. К. **ДЬЮДНИ**

«Впервые с этим свойством [универсальностью вычислений] я столкнулся еще до того, как пошел в школу. Тогда не было никаких компьютеров, но у нас были детские конструкторские наборы. Один из них назывался «тинкертоЙ» ... Удивительно, но его палочек и катушек хватало на то, чтобы построить что УГОДНО.»

Марвин Минский

МНОГИЕ ЛИ из нас помнят конструкторы «тинкертой» - наборы цветных деревянных палочек и катушек с отверстиями? Глядя на сооружения в виде башен и кранов, многие ли из нас задумывались тогда в детстве, до каких пределов простираются возможности тинкертоя? Представляли ли мы себе сооружения высотой до потолка? Возможно, но на такие постройки у нас не хватало ни деталей в наборе, ни времени. Однако несколько лет назад нашу былую фантазию реализовали студенты из Массачусетского технологического института (МТИ), построив компьютер, целиком (точнее, почти целиком) состоящий из деталей тинкертоя.

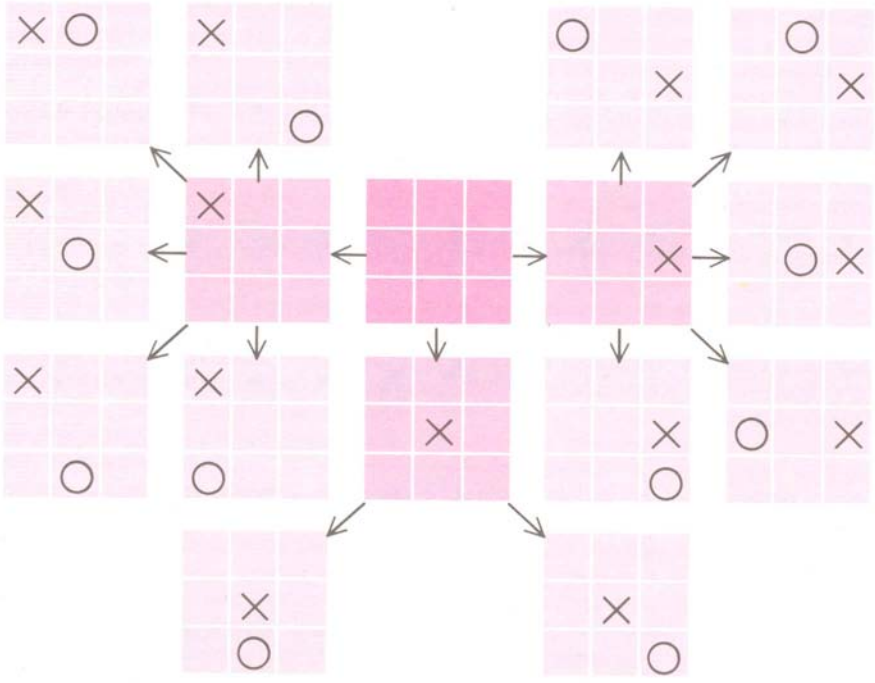
Издали компьютер из тинкертоя выглядит как плод необузданной детской фантазии или, по замечанию одного из студентов, как палочно-катушечный вариант космической научной лаборатории из кинофильма «Космическая Одиссея: 2001 Г.». В отличие от лаборатории инопланетян компьютер, собранный из палочек и катушек, играет в крестики-нолики. Спереди сооружения, пощелкивая и как бы на ощупь вниз, перемещается конструкция, называемая головкой чтения. В какой-то момент щелканье прекращается, наступает таинственная тишина; начинает вращаться деталь, называемая «сердечником», затем вращение завершается другим странным звуком, и в движение приходит «выходная уточка» - конструкция, по Форме напоминающая птицу; она наклоняется вперед со своего насеста, так что ее клюв указывает на число, определяющее следующий ход, который делает компьютер по ходу игры в крестики-нолики.

Что же конкретно просматривает головка чтения, когда она, ощупывая сооружение, перемещается вниз? Она проходит вдоль 48 рядов «запоминающих валиков», кодирующих все важнейшие комбинации крестиков и ноликов, которые могут возникнуть во время игры (см. рисунок на с. 89). Каждый валик представляет собой последовательность гладких катушек, соединенных на оси палочками и разбитых на 9 групп, по 3 в каждой группе, так что на каждый квадрат игровой доски приходится по одной группе. Присутствие или отсутствие катушки в группе указывает на то, что соответствующая клетка игровой доски свободна или занята одним из знаков - крестиком или ноликом.

Компьютер из тинкертоя не полностью автоматизирован: оператор должен перемещать головку чтения и осуществлять ввод «данных». После того как человек, играющий с компьютером, делает ход, оператор подходит к машине, чтобы установить соответствующим образом сердечник внутри головки чтения, регистрируя таким образом сделанный ход. Затем оператор тянет за шнурок, чтобы взвести механизм сердечника перед тем, как он начнет поиск ответа. Когда компьютер находит запоминающий валик, состояние которого идентично положению в игре, сердечник поворачивается и компьютер указывает свой ответный ход.

Понять, как работает машина, наверное, будет проще, если рассказать историю ее создания. Машину построили студенты МТИ Э. Джи, Э. Хардебек, Д. Хиллис, М. Мински и братья Барри и Брайен Силвермен. Теперь большинство из них уже закончили институт и работают в различных областях информатики и вычислительной техники. Наибольшую известность приобрел, пожалуй, Хиллис. Он был «движущей силой» в компании Thinking Machines, Inc., создавшей широко известный параллельный суперкомпьютер, так называемую коммутационную машину Connection Machine. (Видимо, конструктор тинкертой может кое-чему научить.)

В 1975 г. Хиллис и Брайен Силвермен, когда они были еще второкурсниками, приняли участие в учебном



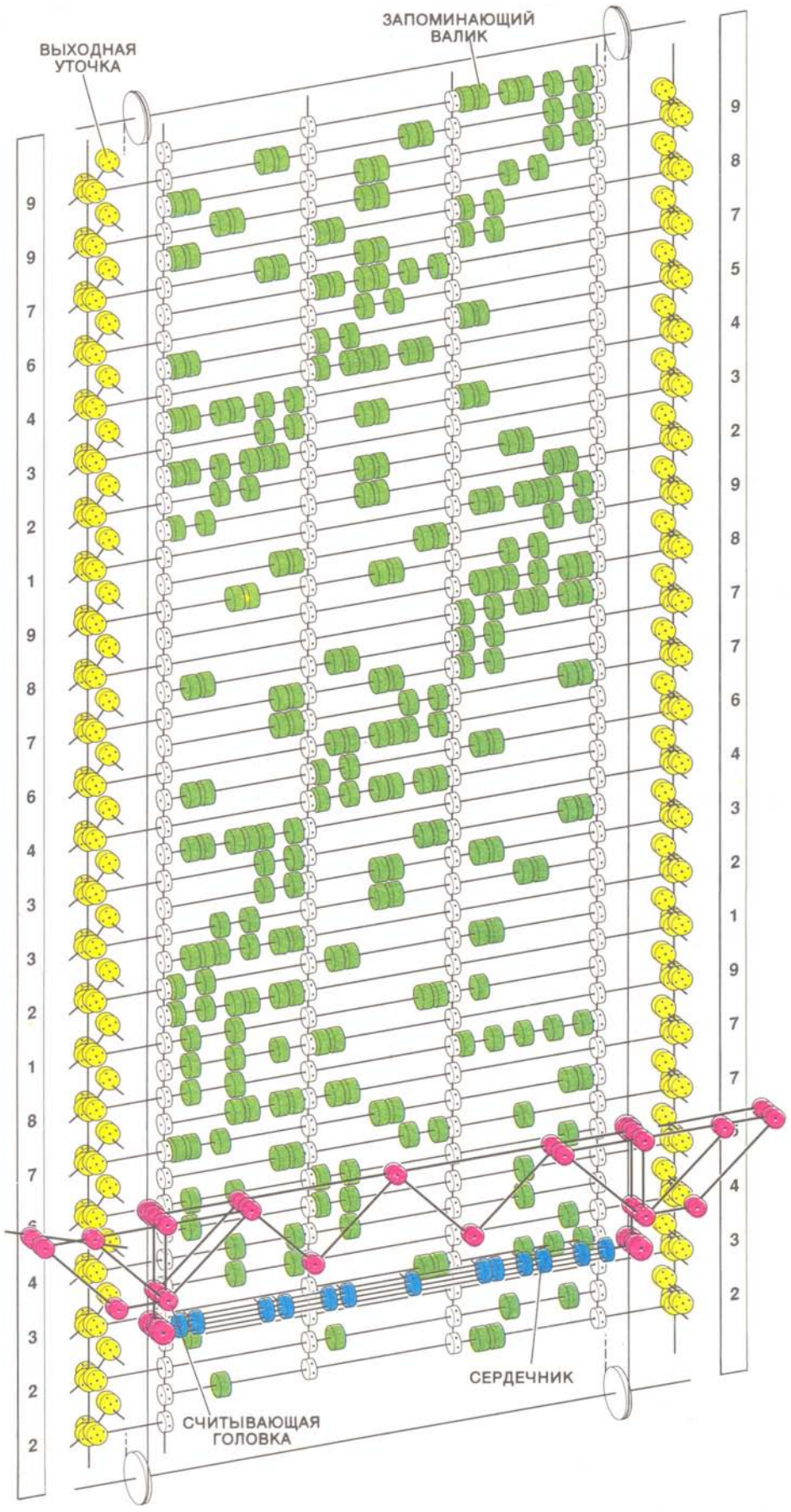
Первые три уровня дерева игры «крестики-нолики»

проекте, целью которого было построить какое-нибудь цифровое устройство из тинкертоя. Студенты с удовольствием занялись этой игрой. Один из них сделал инвертер, логическое устройство, преобразующее двоичные сигналы - 1 в 0 и наоборот. Другой сделал вентиль ИЛИ: если один из входов этого устройства равен 1, то выход всегда будет также равен 1. Студенты быстро поняли, что конструктор тинкертой обладал свойством «универсальности вычислений» - этот теоретический термин характеризует набор компонентов, из которых можно собрать полностью программируемую вычислительную мащину. Однако теоретическая возможность - это одно, а практика, которая требует и времени и средств, - совсем другое.

Эти потребности были удовлетворены окольным путем благодаря интересу Хиллиса к роботам и его стремлению создать один из них, о чем он время от времени говорил со своими друзьями. Слухи о его мечтах каким-то образом достигли Х. Лаукса, бывщего в то время директором Среднеамериканского центра в Хот-Спрингсе (шт. Арканзас). Не хотят ли студенты построить робота для витрины музея, принадлежавшего центру? Студенты согласились, но проект оказался слишком сложным. Тогда и всплыла старая мечта о машине из деталей тинкертоя. Может быть, вместо робота центр не против приобрести компьютер, собранный из тинкертоев?

Хиллис и его коллеги принялись за постройку первого компьютера на тинкертоях в лаборатории МТИ. Первая модель в отличие от последующей была довольно громоздкой и имела форму куба со стороной около метра. Конструкция выглядела весьма сложной. Набитая до отказа логическими схемами, сделанными целиком из деревянных палочек и катушек, машина указывала свои ходы, вращая девять флажков, расположенных в верхней части сооружения. Перед отправкой в Хот-Спрингс прототип компьютера пришлось разобрать, но после того, как его снова собрали на месте, компьютер уже так никогда и не заработал как следует. Тем не менее он все же был интригующим экспонатом. (В настоящее время он демонстрируется в Музее вычислительной техники в Бостоне.)

В 1979 г. Лаукс снова обратился к студентам. Не смогут ли они сделать новый компьютер из тинкертоев, который бы работал по-настоящему? В то время Силвермен жил и работал в Оттаве, а Хиллис - в Бостоне. Переговариваясь по телефону, Хиллис и



Компьютер из тинкертоев всегда готов сразиться в «крестики-нолики»

Силвермен разработали более совершенную конструкцию. Она должна была быть надежной, а значит, и простой. Они решили выставить все возможные комбинации игры «крестики-нолики» в ряд последовательностей и придумать какой-нибудь считывающий механизм, который передвигался бы по этому ряду от последовательности к последовательности и находил бы позицию, соответствующую положению в игре на данный момент. Само узнавание этой позиции непосредственно вызывало бы появление заранее заготовленного ответа.

Пока Хиллис обдумывал способы представления позиций игры «крестики-нолики» в цифровых компонентах тинкертоя, Силвермен занимался анализом самой игры. Чтобы получить представление о сложности этой детской игры, читатели могут взглянуть на игровое дерево, приведенное на с. 88. В середине дерева располагается исходная позиция - решетка из квадратных клеток 3 х 3, на которой пока нет ни крестиков, ни ноликов. Из этой исходной позиции могут возникнуть 9 первых ситуаций, в зависимости от того, в какую клетку будет поставлен первый крестик. На рисунке показаны лишь три варианта; остальные 6 можно получить вращением этих трех. Каждый их трех вариантов на втором уровне дерева игры порождает другие возможные позиции. Например, вариант, в котором «крестики» делают первый ход на центральную клетку, а затем ставится «НОЛЬ»,приводит к двум различным ситуациям. Два других варианта на втором уровне порождают по пять новых позиций на третьем уровне.

Из соображений симметрии многие ветви игрового дерева усечены: исключенные ветви являются результатом вращения или зеркальным отражением оставленных вариантов. Люди легко обнаруживают симметрию, в то время как компьютер должен быть для этого специально запрограммирован или сконструирован. В мире конструкций из тинкертоев достижение симметрии возможно при очень сложной конструкции.

Силвермен, конечно, имел дело с деревом, во много раз большим того фрагмента, который представлен здесь на рисунке. Однако, как говорится, терпение и труд все перетрут; Силвермен обнаружил, что многие позиции можно слить в одну, когда необходимо сделать вынужденный ход. Предположим, что две клетки в каком-то ряду уже содержат нолики, а третья свободна. Тогда содержимое двух остальных рядов уже не имеет значения, поскольку в данном случае крестики должны заполнить эту третью клетку, и если они этого не сделают, то проиграют .

Силвермен был в восторге, когда ему удалось свести число возможных позиций к 48. Для каждой из них он заготовил правильный ход. Оказавшийся удивительно коротким список возможных позиций на доске обрадовал и Хиллиса. Когда группа собралась в Хот-Спрингсе, сказал Силвермен, «у нас был лишь список из 48 позиций, и мы очень смутно представляли себе, каким образом их можно интерпретировать механически».

Читатели с фанатичной склонностью к исследованию игр (или просто застрявшие на аэровокзале) могут ПО-~ развлечься, построив полное дерево игры на нескольких листах бумаги. Интересно, сколько времени потребуется, чтобы нарисовать 48 позиций, возникающих в игре «крестики-нолики»? Разобраться с этим вопросом помогут четыре символа X, 0, пробел и тире, означающее «безразЛИЧНО».

Обосновавшись в Хот-Спрингсе, члены группы приобрели необходимый «строительный» материал для палочно-катушечной Одиссеи: 30 коробок тинкертоев, по 250 деталей в каждой. Затем они занялись сборкой опорной фермы, к которой должны были крепиться все 48 валиков памяти. Чтобы точно объяснить устройство этих валиков, придется немного отвлечься и изложить правила, принятые группой для кодирования позиций игры.

Во-первых, клетки игрового поля были пронумерованы следуюшим образом:

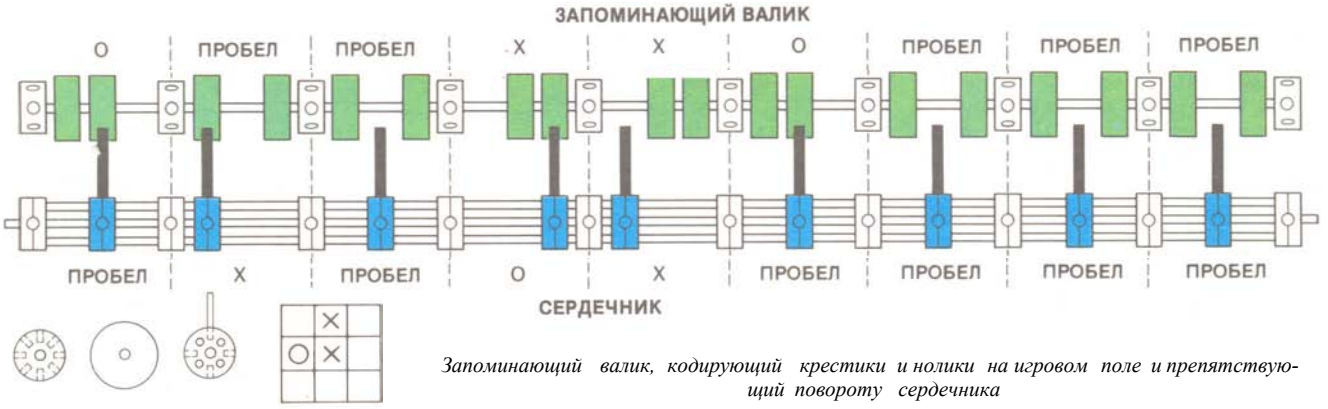
123
456
789

Далее, запоминаюший валик делился на девять последовательных участков, в которых хранил ась информация о состоянии каждой клетки, слева направо.

Каждый участок в свою очередь подразделялся на три равные секции, по одной на каждый возможный элемент, заполняющий данную клетку: X, 0 или пробел. Каждый вариант кодировался отсутствием соответствующей катушки. Например, если в данной клетке находился крестик, то запоминающий валик не содержал катушки в первой секции, но содержал их во второй и третьей секциях. Аналогичным образом отсутствие катушки во второй секции означало незанятую клетку, а отсутствие катушки в третьей секции - нолик. Наконец, если отсутствовали все три катушки, это означало, что содержимое данной клетки не имело значения.

Говоря о запоминающих валиках, нельзя не упомянуть и о сердечнике - детали пальцевидной формы. Здесь уместно сказать о том, что английское слово digital имеет два основных значения: пальцеобразный и цифровой. Оно происходит от латинского слова digitus (палец). Общи ость корней этих двух слов не случайна: люди, как известно, сначала научились считать на пальцах, а затем перешли на цифры. Поэтому сердечник, о котором идет речь и который по внешнему виду напоминает клешню с девятью пальцами, по-английски называется digital core. Сердечник и запоминающий валик показаны на рисунке, приведенном внизу.

Сердечник состоял из девяти рав-



Запоминающий валик, кодирующий крестики и нолики на игровом поле и препятствующий повороту сердечника

ных секций. У каждой из них был свой палец - короткий стержень, торчащий из ободка скользящей катушки. В каждой секции палец мог перемещаться вдоль оси сердечника и занимать одно из трех положений: одно для X, одно для Ои одно для пробела. Таким образом, сердечник мог представлять любую из возможных позиций на игровом поле, закодированную положениями девяти пальцев, устанавливаемых оператором после каждого очередного хода. На рисунке на с. 90 положение пальцев (последовательно 2, 1, 2, 3, 1, 2, 2, 2, 2) соответствует позиции, изображенной там же.

Но если сложившаяся на данный момент ситуация на игровом поле хранится в сердечнике, то нужна ли компьютеру из тинкертоя еще какая-нибудь память? Нельзя ли построить такую систему из палочно-катушечных логических элементов, чтобы компьютер мог «подумать» над позицией и выдать ответный ход? В принципе это возможно, но подобный компьютер на тинкертоях был бы слишком сложным и имел бы колоссальные размеры. Запоминающие валики почти полностью исключили необходимость в размышлении. Значительную часть этой работы выполнял другой компьютер, запрограммированный Силверменом с целью анализа игры «крестики-нолики». А все функции механического компьютера сводились просто к поиску сложившейся позиции на запоминающих валиках. Единственная же цель этого поиска, конечно, заключалась в том, чтобы выбрать правильный ход.

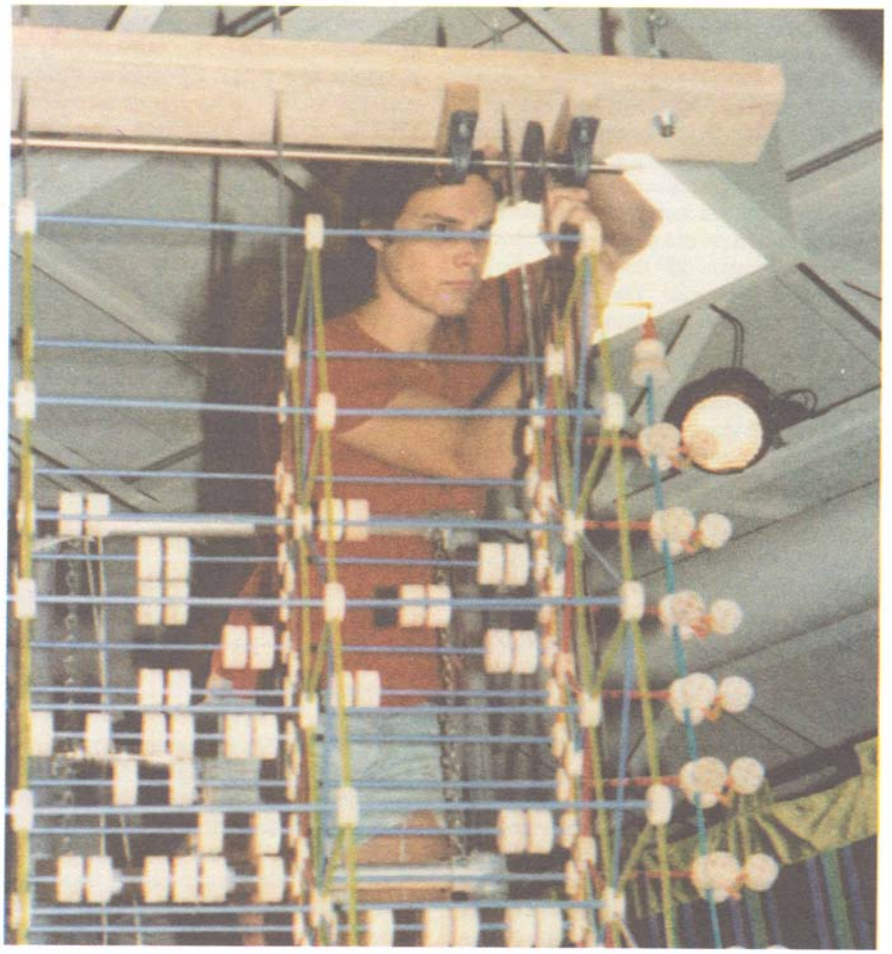
На рисунке, приведенном на с. 89, видно, что каждому запоминающему валику соответствовало определенное число, записанное на бумажной полоске, висящей рядом с его выходной уточкой. Эти числа обозначили ответные ходы машины. В то время как головка чтения щелкает, продвигаясь вдоль ряда валиков, сердечник пытается провернуться, но не может до тех пор, пока хоть одна катушка запоминающего валика блокирует один из девяти пальцев сердечника. Только когда головка чтения прилегает к валику, отражающему сложившуюся позицию на игровом поле, все девять пальцев оказываются свободными, и сердечник проворачивается.

При помощи хитроумного механизма стержень, торчащий из одного конца сердечника, зацепляет другой стержень, соединенный с выходной уточкой. Таким образом, вращающийся сердечник сталкивает уточку с насеста и она указывает своим клювом на число, написанное на бумажной полоске.

Сторонники «настоящих» компьютеров, наверное, усомнятся в том, что сооружение из тинкертоев действительно заслуживает названия «компьютер». Безусловно оно не является машиной, программируемой в обычном смысле слова: здесь нельзя сесть за клавиатуру и набрать на ней программу, которую должна выполнить машина. Но, с другой стороны, можно изменить содержимое запоминающих валиков и таким образом перепрограммировать компьютер на другие игры. Представьте себе устройство из деталей тинкертоев, играющее в «го-моку нарабе» (игра с полем 11x 11 клеток, в которой один игрок пытается выстроить пять черных фишек в ряд, одновременно пытаясь помешать другому игроку создать такую же комбинацию из пяти белых фишек). Компьютер из тинкертоев, запрограммированный на эту игру, возвышался бы, наверное, до стратосферы.

Главный урок, которому может нас научить компьютер на тинкертоях, заключен в удивительном свойстве цифровых вычислений: в основе всякого вычисления лежит просто определенный поток информации. Материальная часть самого компьютера может принимать разнообразные формы и иметь различные конструкции. Можно построить безукоризненно действующие компьютеры не только из тинкертоев, но также из бамбуковых стержней, веревок и блоков (см. статью в рубрике «Занимательный компьютер» в июньском номере журнала за 1988 г.), пластмассовых трубок с водой и даже, как это ни удивительно, из электронных компонентов. Последние, конечно, предпочтительнее ввиду их высокого быстродействия. Не следует с иронией воспринимать компьютер, сделанный из тинкертоев, только потому, что он не электронный. В конце концов и провода с электрическим током, по-видимому, не являются наилучшим средством для быстродействующих компьютеров. Фотоны и оптические волокна начинают все больше вытеснять их, поскольку обеспечивают более высокое быстродействие.

На самом деле, детали тинкертоя хорошо подходят для цифровых вычислений. Например, в запоминающих валиках используется двоичный ПрИНЦИПприсутствие или отсутствие



Э. *Хардебек собирает компьютер из тинкертоев*

катушек обозначает состояние данной клетки на поле «крестиков-ноликов». В работе сердечника также присутствует цифровая логика: он может повернуться лишь в том случае, когда ни один из его пальцев не блокируется соответствующими катушками на запоминающем валике. Здесь работает логическая операция И. Проследить за логикой работы сердечника можно по рисунку на с. 90: если первая катушка отсутствует в первой секции запоминающего валика И, вторая катушка отсутствует во второй секции И, третья катушка отсутствует в третьей секции И и т. д. - только если все 9 условий выполняются одновременно, сердечник может повернуться. Достоинство компьютера на тинкертоях не только в его остроумной механике, но и в тонкой логике.

Поклонники тинкертоя будут рады узнать, что студенты МТИ лишь за несколькими исключениями использовали в своей конструкции только деревянные палочки и катушки. Кое-где ферму укрепляют алюминиевые трубки. Два проволочных кабеля, ось и кривошип сообщают машине потенциальную механическую энергию, необходимую для выбора следующего хода. Наконец, места соединений между палочками и катушками были укреплены клеем и специальными шпильками, при помощи которых обычно прикрепляют к стене мемориальные доски. Создатели компьютера из деталей тинкертоя вставляли эти шпильки в отверстия, просверленные в ободке катушки, в ее центральное отверстие и пропускали через вставленную палочку - задача, которую нужно было повторить более 1000 раз. (Когда Хиллис зашел в магазин, чтобы закупить несколько тысяч таких шпилек, продавец пришел в изумление. «Дело в том, - невозмутимо сказал Хиллис,- что нам нужно установить очень много мемориальных досок»~.)

Компьютер из тинкертоя разделил участь большинства музейных экспонатов. Его разобрали на части и сложили в ящики. Он находится в хранилище Среднеамериканского центра в ожидании, быть может, новой славы. Кто знает, возможно, когда-нибудь он снова будет, пощелкивая, идти от победы к победе - этот монумент детской мечте, машина из тинкертоя.

ВОТ УЖЕ шестой год я веду рубрику «Занимательный компьютер» и могу с сожалением констатировать, что есть многие вещи, которые выходят за рамки возможностей этой рубрики. Из-за недостатка места и времени мы не можем, например, научить читателей программированию, не можем упомянуть о сотнях увлекательных программ и о многих присылаемых читателями занятных историях и идеях, касающихся компьютеров. Потребовалось шесть лет, чтобы найти наконец способ, как удовлетворить эти и другие потребности: издание периодического бюллетеня новостей. Называется он «Алгоритм: бюллетень по персональному программированию» (Algorithm: The Personal Programming Newsletter); его первый номер уже поступил в продажу.

Бюллетень будет выходить раз в два месяца, и мы попытаемся его сделать интересным и содержательным. Два раздела в бюллетене будут отведены любителям программировать. Один - для начинающих, другой - для более опытных программистов. В конце журнала будут регулярно появляться первые публикации «подпольных» программ со всех концов света. Письма, обзорные статьи и различные мнения специалистов - все это призвано открыть перед читателем неизведанный мир. Я с удовольствием вышлю экземпляр первого номера бюллетеня бесплатно всем, кто напишет мне на адрес журнала «Scientific American».

Наука и общество

Странное поле

НЕЙТРОНЫ,ядерные частицы, не имеющие заряда, и электроны, элементарные носители отрицательного заряда, взаимодействуют таким странным способом, что даже Майкл Фарадей, отец электродинамики, почувствовал бы себя не в своей тарелке, если бы узнал об этом. Недавно ученые из Университета шт. Миссури в Колумбии и Мельбурнского университета в Австралии провели эксперимент, показавший, что нейтрон может «чувствовать» присутствие электрона на расстоянии, не испытывая воздействия, обусловленного электрическим или магнитным полем электрона.

Чтобы поверить в существование этого слабого эффекта, необходимо сначала ознакомиться с элегантной теоретической работой Я. Аронова и А. Кашера из Тель-Авивского университета. Эти ученые утверждают, что такое взаимодействие возможно, поскольку электрон создает так называемое потенциальное поле (потенциал), которое может приводить к появлению электрических и магнитных полей (см. статью: Дж. Имри, Р. Уэбб. Квантовая интерференция и эффект Аронова-Бома, «В мире науки», 1989, № 6). Потенциальное поле появилось вначале в работах по квантовой механике и теории относительности как удобное с математической точки зрения понятие, но никакая физическая сущность с ним не связывалась. Однако теперь физики начали использовать его не только для формальных расчетов. Именно потенциальное поле в чистом виде - такое, которое не проявляется как магнитное или электрическое, - может влиять на поведение нейтрона.

Каким образом нейтрон «чувствует» это потенциальное поле? Нейтрон обладает магнитным моментом (создает магнитную напряженность, ориентированную в определенном направлении), который легко обнаруживается каждый раз, когда нейтрон попадает в магнитное поле. Например, в магнитном поле Земли вектор магнитного поля нейтрона прецессирует с частотой 1000 с- 1. Ааронов и Кашер обосновали возможность еще более «эфемерного» эффекта: взаимодействия нейтрона и чистого потенциального поля.

Обнаружить эффект Аронова--Кашера решила группа экспериментаторов, возглавляемых А. Чиммино, Дж. Опатом и Э. Клейном из Мельбурнского университета, а также Г. Кайзер и С. Вернер из Университета шт. Миссури. В статье, опубликованной в журнале «Physical Review Letters», эти ученые сообщают, что они направляли пучок нейтронов на электрод так, что каждый нейтрон мог пройти либо выше, либо ниже него. Об элементарных частицах нельзя заранее сказать, какой путь - «нижний» или «верхний» - выберет частица. Нейтрон можно представить в виде волны, в которой закодирована информация о вероятности его обнаружения по ту или другую сторону электрода в данный момент времени. Можно считать, что нейтронная волна расщепляется и проходит одновременно и выше и ниже электрода.

«Верхняя» и «нижняя» волны направлялись затем на кристалл кремния, где они интерФерировали. Если волны усиливают друг друга, то шанс